



## TEPKİ YÜZEYİ YAKLAŞIMI UYGULANARAK KAUÇUK ÜRETİMİNDE MAKİNE-SÜREÇ PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

<sup>1</sup>Aysun SAĞBAŞ<sup>ID</sup>, <sup>2</sup>Nejla DİKMEN ÖZKAN<sup>ID</sup>

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ,  
TÜRKİYE

<sup>1</sup>asagbas@nku.edu.tr, <sup>2</sup>nejladikmen@gmail.com

(Geliş/Received: 08.06.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.12.2020)

**ÖZ:** Çalışmanın amacı; bir kauçuk üretim işletmesinde istatistiksel deneysel tasarım uygulanarak, kalite hatalarını ve kalite kaynaklı ürün maliyetini minimize eden makine-süreç parametrelerinin optimizasyonunu sağlamaktır. Bu amaçla, enjeksiyon makinesinde üretilen ürünün kalite özellikleri (patlak, yırtık, yanık ve çapak) tepki değişkeni olarak belirlenmiştir. Belirlenen kalite özelliklerine etkisi olan, enjeksiyon makine parametreleri (kalıp sıcaklığı, pişme zamanı ve enjeksiyon hızı) girdi değişkeni olarak seçilmiştir. Çalışma, Tekirdağ (Çerkezköy) bölgesinde çamaşır makinesi üretimi yapan bir fabrikanın tedarikçisi olan işletmede gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, tepki yüzeyi tasarımlarından 23 tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanmış olup, deneyler çamaşır makinesi sızdırmazlık contası üretimi için gerçekleştirilmiştir. Minitab paket programı yardımıyla istatistiksel analizler uygulanmış olup, her bir tepki değişkeni için regresyon modeli geliştirilmiş ve tepki değişkenlerini optimize eden makine-süreç parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çoklu tepki optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modeller için güvenilirlik analizi yapılarak sonuçların uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Optimizasyon, Deneysel Tasarım, Makine-Süreç Parametreleri, Kalite, Kauçuk

### Optimization of Machine-Process Parameters with Response Surface Approach in Rubber Production

**ABSTRACT:** The purpose of the study is to optimize machine-process parameters which minimize quality errors and quality-sourced product cost in a rubber factory. For this purpose, product's quality characteristics (burst, torn, burn and burr) are determined as response variable. Injection machine parameters (mold temperature, cooking time and injection speed) that affect the determined quality properties, were selected as input variables. The study was carried out in a plant that is the supplier of a factory producing washing machines in the Tekirdağ (Çerkezköy) region. In this study, 23 full factorial experimental design which is called the response surface design was applied, experiments were carried out for the production of washing machine sealing gaskets. Statistical analysis was applied with the help of Minitab package program, regression model was developed for each response variable and multiple response optimization was performed in order to determine the machine-process parameter that optimizes the response variables. Reliability analysis was performed for the developed models and the applicability of the results was evaluated.

**Key Words:** Optimization, Experimental Design, Machine-Process Parameters, Quality, Rubber

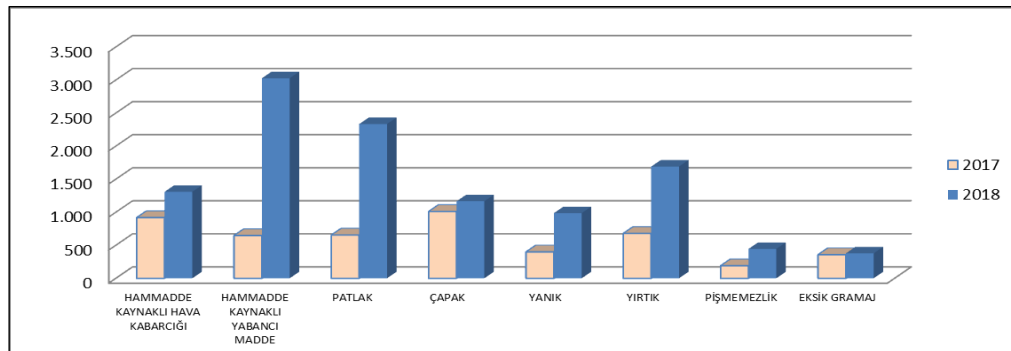
### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kauçuk malzemesi, dayanıklı ve esnek bir yapıya sahip olması nedeniyle tekstil, otomotiv, beyaz eşya, inşaat, gıda, hayvancılık gibi pek çok sektörde sızdırmazlık elemanları, taşıtlarda tekerlek lastiği,

akaryakıt ve hidrolik fren hortumları, transmisyon kayışları, contalar, ses ve titreşim önleyici ürün üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kauçuk hammaddesi kullanılarak üretim yapılan işlemlerde; kalite ve performansta gerçekleştirilecek iyileştirmeler, elde edilecek ürünün maliyeti ve kalitesi açısından çok büyük önem arz etmektedir. Kauçuk hammaddesinin yüksek fiyatlı olması ve belirli işlemlere tabii tutularak yeniden kullanımının mümkün olmaması nedeniyle; üretim sürecinde fire ve kayıpların azaltılması, işletmeler için çözüm getirilmesi gereken öncelikli sorunlar arasında olup, maliyet ve kalite ekseninde işletmenin rekabet gücünün artırılmasına önemli katkı sağlama potansiyeline sahiptir (Acıgöz, 2014, Erbatır ve Erkek 2007).

Bu çalışmada; kauçuk hammaddesi kullanılarak üretim yapılan bir işletmede; üretilen ürünün kalite özelliklerine etki eden makine-süreç parametreleri incelenmiş olup, kalite hataları kaynaklı toplam maliyetin minimum yapılarak, istenilen kalitede ürün üretilebilmesi amacıyla bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan çoklu tepki optimizasyon modeli çalıştırılmış ve ürün kalitesini ve kalite kaynaklı ürün maliyetini minimize eden makine-süreç parametrelerinin değeri tahmin edilmiştir. Bu kapsamda; kauçuk üretim sektöründe; deneysel tasarım ve optimizasyon ekseninde kalite ve maliyet optimizasyonu amacıyla, makine-süreç parametrelerinin tahmin edilmesine yönelik daha önce yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanmamış olması; çözümü araştırılan problemi daha da önemli hale getirmektedir. Çalışmada; kullanım alanı çok geniş olan “EPDM” (Ethylene Propylene Diene Monomer) kauçuk hammaddesinden oluşturulan ve belirli kalite değerini sağlayan, enjeksiyon makinesinde şekillendirilmiş ürünün, kalite hataları ve kalite hataları kaynaklı ürün maliyetinin minimizasyonu için tepki yüzeyi deneysel tasarımlarından tam faktöriyel tasarım uygulanarak makine-süreç parametrelerinin optimum değerleri belirlenmiş olup, bu süreçte elde edilecek tasarrufun boyutu hesaplanmıştır. Kauçuk hammaddesinin işlem gördükten sonra yeniden kullanımının mümkün olmaması, hammadde maliyetinin yüksek olması, ayrıca, ürün maliyetinin minimize edilmesi konusunda daha önceden yapılmış herhangi bir optimizasyon çalışmasının olmaması, kalite hataları kaynaklı hurdaya ayrılan ürünlerin azaltılmak istenmesi, ve dünyadaki kauçuk hammaddesi kullanımının son yıllarda hızlı bir artış göstermesi ekseninde edilecek tasarrufun boyutu düşünüldüğünde; çözümü araştırılan problemin önemi açıktır. Bu kapsamda; yapılan çalışma sonuçlarının uygulamada devreye alınması ile çalışmanın faydasının daha da artması beklenmektedir.

İncelenen problemde, ürün kalite kabul testleri “EPDM” kauçuktan üretilen çamaşır makinesi FX 887 sızdırmazlık contası üzerinde yapılmıştır. Çalışmanın yapıldığı işletmede; FX 887 sızdırmazlık contası için, 2017-2018 yılları arasında proses koşullarından kaynaklanan hatalar nedeniyle fire olarak ayrılan malzemeler için oluşturulan hata grafiği (Şekil 1)’de gösterilmiştir.

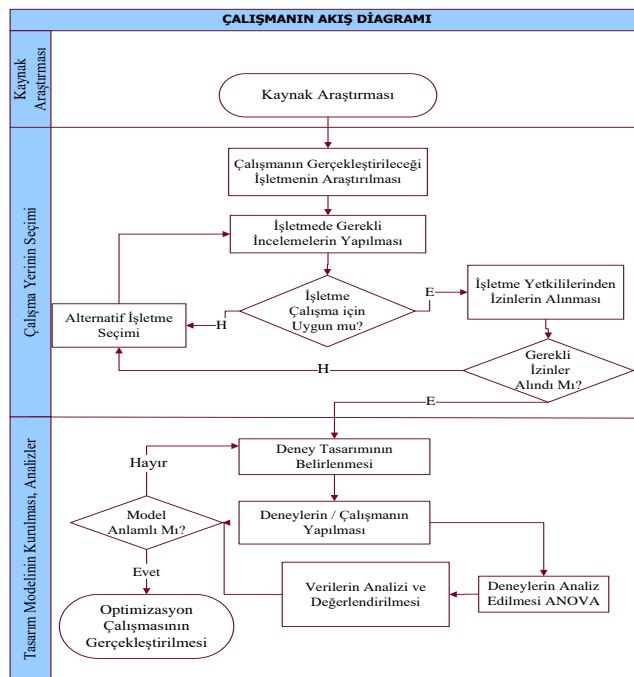


Şekil 1. Sızdırmazlık contası üretiminde karşılaşılan hatalar (2017 ve 2018 yılları)

Figure 1. Failures encountered in the production of sealing gaskets (2017 and 2018 years)

Şekil 1 incelendiğinde; en çok karşılaşılan hataların; hava kabarcığı, patlak, yırtık, yanık, çapak, pişmemelik, dalma ve eksik gramaj olduğu görülmektedir. Bu nedenle, gerçekleştirilen çalışmada; patlak, yırtık, yanık ve çapak olmama gibi kalite özellikleri tepki değişkeni olarak belirlenmiştir. İşletmede yapılan incelemeler, tecrübelerin gözden geçirilmesi-değerlendirilmesi (know-how) ve bilimsel kaynaklardan da yararlanarak, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı, pişme süresi gibi enjeksiyon parametreleri

karar değişkenleri (girdi değişkenleri) olarak seçilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği işletmede işletme politikası gereği, hammadde tedarikçilerinde bir değişiklik yapılamadığı için, hammadde kaynaklı hataların araştırılması olanaklı olmamıştır. Belirtilen kısıt nedeniyle; kalite hataları kaynaklı ürün maliyetinin azaltılması ve ürün kalitesinin optimize edilmesi amacıyla, süreç parametrelerini kapsayan bir deneysel tasarım oluşturulması ve tahmin modeli kurularak ürün kalitesine etki eden süreç parametrelerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Kauçuk hammaddesinin pahalı olması nedeniyle kalite problemlerinden kaynaklı yüksek maliyetin azaltılması, işlem görerek oluşan maddenin yeniden kullanılması mümkün olmadığı için hurdaya ayrılan ürünlerin minimize edilmesi ve makine proses parametrelerinin optimizasyonu konularında daha önceden herhangi bir çalışma yapılmamış olması çözümü araştırılan ve model geliştirilmeye çalışılan problemi daha da önemli hale getirmektedir. Çalışmanın planlama, uygulama ve analiz adımları, Şekil 2’de verilmiştir.



**Şekil 2.** Çalışmanın akış diagramı

*Figure 2.* Work flow chart of the study

Kauçuk malzemesi kullanılarak yapılan ve istatistiksel deneysel tasarım uygulanarak tepkiyi optimize etmeyi amaçlayan çalışmalar konusunda detaylı bir literatür araştırması yapılmış olup, önceki çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Ghoreishy ve diğ. (2001) düşük boy oranlı çelik kuşaklı radyal lastiğin boncuk bölümü için optimize edilmiş kauçuk bileşiklerinin geliştirilmesi ile ilgili yaptıkları çalışmada; karışım deneyleri yaparak düşük boy oranlı çelik kuşaklı radyal lastiğin boncuk bölümünün çeşitli kısımları için optimize edilmiş lastik bileşikleri geliştirmişlerdir. Kukreja ve diğ. (2002) tepki yüzeyi tasarımı yaklaşımını kullanarak, kauçuk bileşiklerin bitkisel yağ ve karbon karası kullanılarak fiziksel ve mekanik özelliklerinin optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Deney tasarımında beş seviyeli iki girdi değişkeni kullanılarak merkezi birleşik tasarım uygulanmıştır. Durmaz (2008) çalışmasında, Taguchi deneysel tasarım tekniklerini kullanarak kauçuk vulkanizasyonu aşamasında gerçekleştirilen bir uygulamaya yer vermiştir. Uygulamada, kauçuğun en önemli kalite karakteristiği olarak belirlenen kopma mukavemetinin maksimize edilmesi amaçlanmış olup, yapılan analizlerde mukavemet üzerinde potansiyel etkiye sahip olduğu düşünülen faktör/faktörler ve seviyeleri belirlenmiştir. Kaya (2009), yaptığı çalışmada karışım tasarımı yöntemi ile daire şeklinde bir conta olan “oringi” üretmek için 10 adet girdi değişkeni incelemiştir. Da Costa ve diğ. (2010) tarafından, tepki yüzeyi metodolojisi kullanılarak, polipropilen/etilen-propilen–dien monomer (EPDM)/ hurda kauçuk lastik karışımlarının analizi ve optimizasyonu incelenmiştir. Birlikte dönen ikiz bir ekstruder ve enjeksiyon kalıplamada uygun işlem

yapılmasından sonra, çekme dayanımı ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikler belirlenmiş ve tepki değişkenleri olarak kullanılmıştır. Liu ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada; atık lastik kauçuğun devulkanizasyonu konusu araştırılmış olup, reaksiyon sıcaklığı, basınç, zaman ve devulkanizan üzerindeki difenil disül konsantrasyonunun etkisinin araştırılması amacıyla, 2 seviyeli tam faktöriyel tasarım uygulanmıştır. Lasprilla-Botero ve diğ. (2016) su bazlı bileşenlerin kauçuktan metale bağlanma üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla kesirli faktöriyel tasarım ve tepki yüzey metodolojisi kullanmışlardır. Khed ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada; hibrit elyaf takviyeli çimentolu kompozit malzemesinin akışkanlık ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmış olup, bu amaçla farklı ebatlarda kauçuk kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, tepki yüzey yaklaşımı kullanılarak matematiksel ve istatistiksel analizler uygulanmıştır. Adamu ve diğ. (2018) ince agreganın kırıntı kauçuk malzemeleriyle kısmen değiştirilmesinin ve nano silisin ilave edilmesinin, sıkıştırılmış lastik tabakanın aşınma direnci üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve analiz edilmesi için tepki yüzeyi yaklaşımı çerçevesinde Box-Behnken deneysel tasarım kullanmıştır.

## MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

### Çalışmada Kullanılan Malzeme (Material Used in the Study)

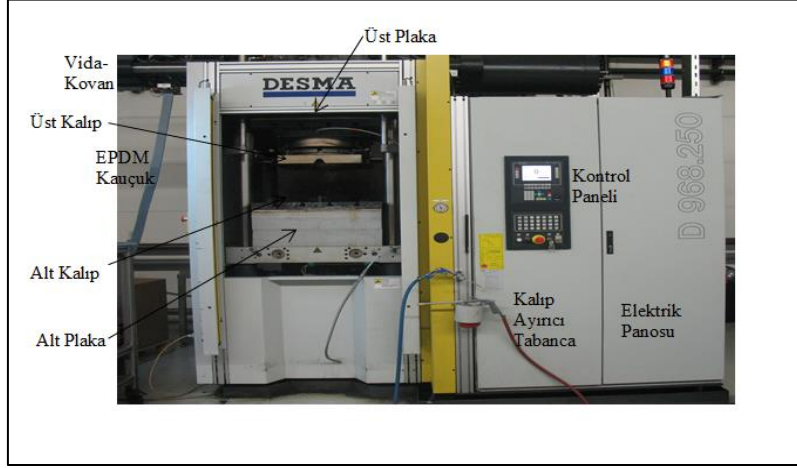
Deneylerde kullanılan malzeme; günlük yaşamda ve sanayide geniş kullanım alanına sahip, lastik malzemelerin temel maddesi olan “EPDM” kauçuk malzemesidir. Kauçuk malzemesi; sızdırmazlık elemanları, uçak lastikleri, hidrolik fren hortumları, amortisör vb. gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmakta olup, otomotiv sektöründe büyük öneme sahip ve fonksiyonel parçaların üretiminin yanı sıra inşaat sektöründe de ısı yalıtım ürünlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Malzemenin en belirgin özellikleri; esnek ve düşük camsı geçiş sıcaklığıdır. “EPDM”, etilen, propilen ve dien monomenlerinden oluşmaktadır (Erbatur ve Erkek 2007). Çalışma kapsamında deneylerin gerçekleştirildiği işletmede; “EPDM” kauçuk malzemesine enjeksiyon işlemi uygulanmış ve sızdırmazlık ve titreşimleri sönmüleme özelliğine sahip olan FX 887 conta (Şekil 3) üretimi yapılmıştır.



Şekil 3. FX 887 Sızdırmazlık contası

Figure 3. Sealing gasket

İşletmeye alınan “EPDM” hammaddesinin girdi kontrol testleri tamamlandıktan sonra, testlere göre kabul gören EPDM hammaddesi üretim şartları göz önünde bulundurularak DESMA enjeksiyon makinesinde enjeksiyon işlemine tabi tutulmuştur. Deneylerin gerçekleştirildiği enjeksiyon makinesi, Şekil 4’ de gösterilmiştir.



Şekil 4. Deneyin gerçekleştirildiği DESMA enjeksiyon makinesi

Figure 4. DESMA injection machine where the experiment is carried out

#### Uygulanan Metodoloji (Applied Methodology)

Deneyel tasarım yöntemleri, mevcut ürünlerin iyileştirilmesi ve yeni ürün/ürünlerin geliştirilmesi amacıyla, mühendislik ve tasarım uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Montgomery, 2013; Savaşkan ve diğ., 2004; Demir, 2004; Şanyılmaz, 2006). Deneysel tasarımın amacı; süreç performansını iyileştirmek için, süreci etkileyen ve bağımlı değişken (tepki değişkeni) üzerinde potansiyel etkiye sahip girdi değişkeni/değişkenleri olarak adlandırılan faktörler üzerinde istenilen değişikliklerin sistematik bir şekilde yapılmasıyla ve belirlenmiş olan bir tasarım matrisine göre, tepki değişkeni üzerindeki değişkenliğin tahmin edilmesi ve yorumlanmasıdır. Deneysel tasarım, süreç yada tepki değişkeni üzerinde etkili olması beklenen proses değişkenlerinin sistematik olarak değiştirilerek, deneylerin gerçekleştirilmesi şeklindedir (Montgomery, 2013; Eken ve Kokangül, 2018). Deneysel tasarım metodlarının uygulanması ile; kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen girdi değişkenleri ile tepki değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirlemek ve süreç optimizasyonunu gerçekleştirebilmek mümkün olmaktadır. Bu eksende istatistiksel deneysel tasarım, mühendislik çalışmalarında önemli ve verimli bir yaklaşımdır ve işletme koşulları değerlendirildiğinde; deneylerin ekonomik şartlar altında ve zaman kısıtının da göz önünde bulundurularak oluşturulması ve sonuçların doğru yorumlanması için deneysel tasarım metodlarının uygulanması etkin bir yaklaşımdır. (Montgomery, 2013; Savaşkan ve diğ., 2004). Tepki yüzeyleri tasarımı; tepki değişkeninin (bağımlı değişken) birden fazla girdi değişkenine bağlı olarak değiştiği ve bağımlı değişkeni optimum seviyeye getirmek için gerekli analizlerin yapılmasında ve uygun modelin oluşturulmasında kullanılan deneysel tasarım tekniklerinin bir bütünüdür. Tepki yüzeyleri deneysel tasarımı, süreci etkileyen karar değişkenleri arasındaki etkileşimi, etkileşimlerin olduğu durumda yönü ve şiddetini, sürecin daha etkili olduğu bağımsız değişkenin belirlenmesini ve bu süreci analiz eden bir yöntem olup, sağladığı avantajlar sebebiyle pek çok alanda kullanılmaktadır (Türkyılmaz, 2011; Aygün 2012). Tepki yüzeyi tasarımlarından biri olan faktöriyel tasarımlar, her bir tasarım noktasında bir faktörü incelemek yerine, faktörler ve faktör etkilerinin birlikte incelendiği bir tasarımdır. Faktöriyel tasarımlar; girdi değişkenlerinin çıktı değişkeni (bağımlı değişken) üzerindeki etkisini araştırmak için sıklıkla kullanılmaktadır. Faktöriyel tasarım etkileri; ana etki ve etkileşimleri olarak gruplandırılır. Tepki değişkeninin girdi değişkenine bağlı fonksiyonu Eşitlik 1. de gösterilmiştir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon \quad (1)$$

$Y$ : Tepki (bağımlı değişken) değişkeni,

$\beta$ : Regresyon katsayısı,

$x$ : Bağımsız değişken

$\varepsilon$ :Deneysel hata

Eşitlik 1. incelendiğinde; girdi değişkenleri için, ana etkiler, etkileşimler ve hata teriminin modeli oluşturduğu görülmektedir. İncelenen problemde bağımlı değişkenler; ürünün patlak olmaması, yırtık, yanık ve çapak olmaması kalite özellikleridir. İşletmede elde edilen veriler değerlendirildiğinde; patlak, yırtık, yanık ve çapak hataları hammaddeden meydana gelen hatalardan sonra en çok rastlanılan hatalardır. Bu sebeple, bu hatalar bağımlı değişken olarak seçilmiştir. Karar değişkenleri de, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı, pişme süresi olarak belirlenmiştir. Çalışmada, işletmenin kısıtları da göz önünde bulundurularak yapılan araştırmalar ile FX 887 sızdırmazlık contası üretimi sırasında faktöriyel deneysel tasarım kullanılarak karar değişkenlerinin tepki değişkenleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla; merkez ve tüm deney noktalarında 3 deney tekrarı gerçekleştirilerek,  $2^3$  tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanmıştır. Değişkenliğin belirlenmesi amacıyla; her bir deney noktasında deney tekrarları (doğrulama deneyleri; merkez noktası ve her bir deney noktasında 3 deney tekrarı) gerçekleştirilmiş olup, toplam 27 adet deney yapılmıştır. Tekrarlama sayısının artmasıyla aralık kestiriminin kesinliği artmakta ve anlamlılık düzeyinde gerçekleştirilen istatistiksel anlamlılık sınavının gücünün de artırılması mümkün olmaktadır. Gerçekleştirilen deneyler rassallık prensibine göre yapılmış olup, deneysel verideki yanlı(sistemik) yanılığın ortaya çıkmasının önlenmesi amaçlanmıştır. Deneylerin arasında bir etkileşim olmaması amacıyla deneylerin sırası rastgele belirlenmiştir. Orta noktalarda da deneyler gerçekleştirilmiş olup, oluşabilecek rastgele hatanın belirlenmesi amaçlanmıştır. Her girdi değişkeni için iki seviye seçilmiştir. Girdi değişkenlerinin alt seviyeleri (-)1 üst seviyeleri ise (+1) ve orta nokta (0) işareti ile gösterilmiştir. Faktör seviyelerinin seçiminde; işletme koşulları ve kısıtları, zaman ve üretilebilirlik sınırı, işletmenin geçmiş tecrübe ve deneyimleri, hammadde maliyeti gibi sınırlamalar etkili olmuştur. Çizelge 1.'de yapılan deneysel çalışmanın girdi değişkenleri ve seviyeleri gösterilmiştir.

**Çizelge 1.** Gerçek ve kodlanmış faktörler için deneysel tasarım matrisi

*Table 1. Experimental design matrix for real and coded factors*

Deney No	Kodlanmış Değişkenler			Gerçek Değişkenler			Tepki Değişkeni
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Pişme Zamanı (s)	Enjeksiyon Hızı (mm/s)	
1	-1	-1	-1	225	60	12,7	y <sub>1</sub>
2	+1	-1	-1	246	60	12,7	y <sub>2</sub>
3	-1	+1	-1	225	86	12,7	y <sub>3</sub>
4	-1	-1	+1	225	60	17	y <sub>4</sub>
5	+1	+1	-1	246	86	12,7	y <sub>5</sub>
6	-1	+1	+1	225	86	17	y <sub>6</sub>
7	+1	-1	+1	246	60	17	y <sub>7</sub>
8	+1	+1	+1	246	86	17	y <sub>8</sub>
9	0	0	0	235,5	73	14,85	y <sub>9</sub>

## ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

Yapılan çalışmada; tepki yüzeyi yaklaşımı ekseninde  $2^3$  tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmış olup, ürünün patlak, yırtık, yanık ve çapak olmaması kalite özellikleri tepki değişkeni olarak; kalıp sıcaklığı, pişme zamanı ve enjeksiyon hızı girdi değişkeni olarak seçilmiş ve tepki yüzeyi deneysel tasarım modeli geliştirilerek, ana etkiler ve etkileşimler analiz edilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği işletmede; üretilen sızdırmazlık contasının hammaddesi olan kauçuk maddesinin üretime uygunluğunun kontrol edilmesi amacıyla, bazı girdi kalite kontrol testleri yapılmaktadır. Bu ekseninde; yapılan çalışma kapsamında hazırlanan numuneler için; sertlik, rheometre ve yoğunluk testleri uygulanmıştır. Rheometre testinde; pişmemiş kauçuk malzemesinden numune alınarak "rheometre" cihazında pişirilmiş ve pişme

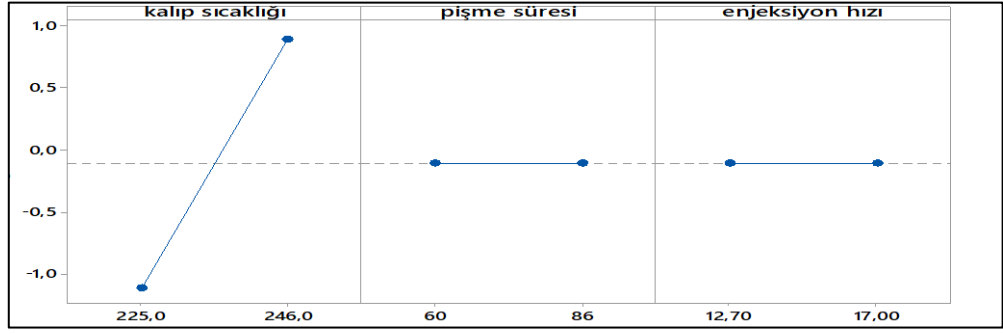
grafik değerlerinin belirlenen aralıklara uygunluğu kontrol edilmiş olup, testler DIN 53529 standardına göre Alpha Rheometer ODR 2000 cihazında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada; tepki yüzeyi deney tasarımlarından tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak belirlenen niteliklere göre rassal olarak deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Minitab programı yardımıyla analiz edilmiştir. Patlak olmaması bağımlı değişkeni için yapılan varyans analizi (analysis of variance; ANOVA) sonuçları Çizelge 2' de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** Patlak olmaması tepki değişkeni için varyans analizi (ANOVA) tablosu

*Table 2. Variance analysis (ANOVA) table (no-break response variable)*

Değişkenliğin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Anlamlılık Seviyesi
Model	7	24,0000	3,4286	24,43	0,000
Girdi Değişkenleri	3	24,0000	8,0000	57,00	0,000
kalıp sıcaklığı	1	24,0000	24,0000	171,00	0,000
pişme süresi	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
2 li Etkileşimler	3	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
3 lü Etkileşimler	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
Hata	19	2,6667	0,1404		
Eğrilik	1	2,6667	2,6667	*	*
Saf hata	18	0,0000	0,0000		
Toplam	26	26,6667			

Çizelge 2' den de görüldüğü gibi; patlak olmaması tepki değişkeni için regresyon modelindeki değişkenliğin kaynağı; pişme süresi, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı gibi girdi değişkeni olarak seçilen bağımsız değişkenlerdir. Faktör etkilerinin patlak olmaması tepki değişkeni incelenebilmesi amacıyla %95 güven aralığında F testi yapılmış F testi ve p anlamlılık değeri ( $\alpha=0,05$ ) kullanılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Çizelge 2' de kalıp sıcaklığının p değeri 0,05' ten küçük olması nedeniyle yalnızca kalıp sıcaklığının etkisinin patlak olmaması tepki değişkeni için istatistiksel açıdan anlamlı olduğu görülmüştür. Diğer faktörler ile bu faktörlere bağlı etkileşimlerinin p değerleri 0,05'ten büyük olması sebebiyle istatistiki açıdan anlamlı olmadıkları yani kalıp sıcaklığı girdi değişkeninin patlak olmaması kalite özelliğine etkisinin istatistiksel olarak etkisinin ihmal edilebilecek kadar önemsiz olduğu belirlenmiştir. Ana faktör ve faktör etkileşimlerinin bağımlı değişken üzerindeki anlamlılığı değerlendirildiğinde, verilerin normal dağılıma uyduğu varsayımı altında testler gerçekleştirilmiştir. Patlak olmaması bağımlı değişkeni için ana faktörlerin etkisi Şekil 5' te gösterilmiştir.



Şekil 5. Patlak olmaması tepki değişkeni için faktör etkileri grafiği

Figure 5. Factor effects graph for no-burst response variable

İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda; patlak olmaması bağımlı değişkeninin regresyon denklemi Eşitlik 2.' de gösterilmiştir.

$$Y_{\text{patlak olmaması}} = -22,5 + 0,095X_1 \quad (2)$$

$$x_1 = \text{kalıp sıcaklığı}$$

Geliştirilen modelden de görüldüğü gibi; kalıp sıcaklığı arttığında yırtık olmaması kalite değişkeni de artmaktadır. Pişme süresi ve enjeksiyon hızı girdi değişkenlerinin patlak olmaması tepki değişkeni için etkisinin %5 anlamlılık seviyesinde istatistiksel olarak ihmal edilebileceği belirlenmiştir. Modelin tahmin gücünün belirlenmesi amacıyla hesaplanan istatistiklerden,  $R^2_{\text{adj}}$  değeri %86,32 olarak bulunmuştur. Bu durum, patlak oluşması hatasının %86,32' sinin kalıp sıcaklığı faktöründen kaynaklandığını göstermektedir. Patlak olmaması bağımlı değişkeninin %13,68' lik değişkenliğinin ise kalıp sıcaklığı faktörü dışında diğer değişkenlerden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Patlak olmaması kalite değişkeni için yapılan analizlere benzer olarak, yırtık olmaması tepki değişkeni için de varyans analizi ve regresyon tahmin modelleme gerçekleştirilmiş olup, yırtık olmaması bağımlı değişkeni üzerindeki kalıp sıcaklığı faktörünün en çok etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Diğer karar (girdi) değişkenlerinin yırtık olmaması bağımlı değişkenine etkisinin %5 anlamlılık seviyesinde ihmal edilebilecek kadar az olduğu belirlenmiştir. Yırtık olmaması bağımlı değişkeni için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 3' te gösterilmiştir.



**Çizelge 3.** Yırtık olmaması tepki değişkeni varyans analizi (ANOVA) tablosu*Table 3. Variance analysis (ANOVA) table (no-tear response variable)*

Değişkenliğin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Anlamlılık Seviyesi
Model	7	24,0000	3,4286	24,43	0,000
Girdi değişkenleri	3	24,0000	8,0000	57,00	0,000
kalıp sıcaklığı	1	24,0000	24,0000	171,00	0,000
pişme süresi	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
2 li Etkileşimler	3	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
3 lü Etkileşimler	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
Hata	19	2,6667	0,1404		
Eğrilik	1	2,6667	2,6667	*	*
Saf hata	18	0,0000	0,0000		
Toplam	26	26,6667			

Çizelge 3' ten de görüldüğü gibi; yırtık olmaması tepki değişkeni regresyon modelindeki değişkenliğin kaynağı; pişme süresi, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı gibi girdi değişkeni olarak seçilen bağımsız değişkenlerdir. Faktör etkilerinin yırtık olmaması tepki değişkeni incelenebilmesi amacıyla %95 güven aralığında F testi yapılmış F testi ve p anlamlılık değeri ( $\alpha=0,05$ ) kullanılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Çizelge 3' te kalıp sıcaklığının p değeri 0,05' ten küçük olması nedeniyle yalnızca kalıp sıcaklığının etkisinin yırtık olmaması tepki değişkeni için istatistiksel açıdan anlamlı olduğu görülmüştür. Diğer faktörler ile bu faktörlere bağlı etkileşimlerinin p değerleri 0,05'ten büyük olması sebebiyle istatistiki açıdan anlamlı olmadıkları yani kalıp sıcaklığı girdi değişkeninin yırtık olmaması kalite özelliğine etkisinin istatistiksel olarak etkisinin ihmal edilebilecek kadar önemsiz olduğu belirlenmiştir. Yırtık olmaması bağımlı değişkeninin regresyon denklemi Eşitlik 3. ile formülize edilmiştir:

$$Y_{\text{yırtık olmaması}} = -22,5 + 0,095x_1 \quad (3)$$

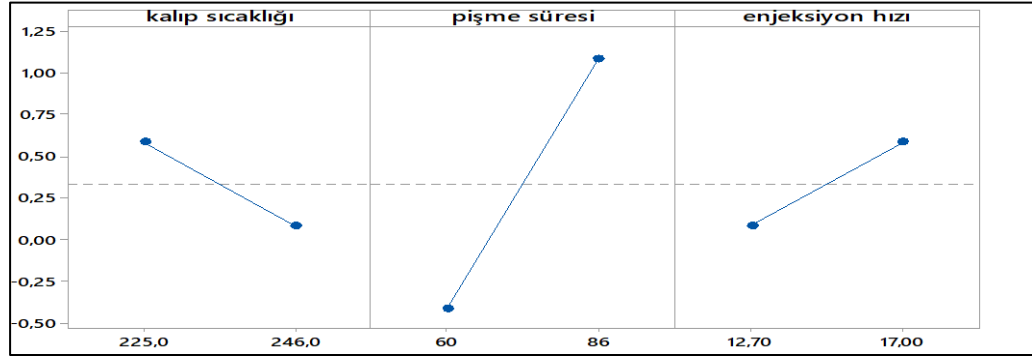
$$x_1 = \text{kalıp sıcaklığı}$$

Yanık olmaması bağımlı değişkeni için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 4' te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.** Yanık olmaması tepki değişkeni varyans analizi (ANOVA) tablosu*Table 4. Variance analysis (ANOVA) table (no-burn response variable)*

Değişkenliğin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Anlamlılık Seviyesi
Model	7	22,5000	3,2143	40,71	0,000
Girdi değişkenleri	3	16,5000	5,5000	69,67	0,000
kalıp sıcaklığı	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
pişme süresi	1	13,5000	13,5000	171,00	0,000
enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
2 li Etkileşimler	3	4,5000	1,5000	19,00	0,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
kalıp sıcaklığı*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
3 lü Etkileşimler	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
Hata	19	1,5000	0,0789		
Eğrilik	1	1,5000	1,5000	*	*
Saf hata	18	0,0000	0,0000		
Toplam	26	24,0000			

Çizelge 4 incelendiğinde; faktörlerin ve faktör etkilerinin p değerinin 0,05' ten küçük olduğu için, ana faktör ve faktör etkileşimlerinin tepki değişkenine etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Geliştirilen modelden ve faktör etki grafiğinden görüleceği üzere (şekil 6); kalıp sıcaklığı arttığında yanık olmaması kalite özelliğinin azaldığı, pişme süresi faktörünün etkisinin en büyük olduğu, diğer karar değişkeni olan enjeksiyon hızı girdi değişkeninin de yanık olmaması tepki değişkeni üzerinde %5 anlamlılık seviyesinde anlamlı ve negatif etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

**Şekil 6.** Yanık olmaması tepki değişkeni için faktör etkileri grafiği*Figure 6. Factor effects graph for no burn response variable*

Faktörlerin ikili etkileşimleri değerlendirildiğinde; yanık olmaması tepki değişkeni için faktör etkileşimlerinin anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan regresyon analizine göre; yanık olmaması bağımlı değişkeninin regresyon denklemi Eşitlik 4.ile formülize edilmiştir.

$$Y_{\text{yanık olmaması}} = -234,4 + 0,930x_1 + 2,738x_2 + 18,02x_3 - 0,01082x_1 x_2 - 0,0733x_1 x_3 - 0,2096x_2 x_3 + 0,000852x_1 x_2 x_3 \quad (4)$$

$x_1$ =kalıp sıcaklığı,  
 $x_2$ =pişme süresi,  
 $x_3$ =enjeksiyon hızı

Oluşturulan regresyon tahmin modelinin  $R^2_{adj}$  değeri %91,45 olarak hesaplandığından; deneysel tasarım modelinde etkili olan karar değişkenlerinin, yanık olmaması bağımlı değişkenindeki değişkenliğin %91,45'ini açıkladığı sonucuna ulaşılmıştır. Çapak olmaması bağımlı değişkeni için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 5' te gösterilmiştir.

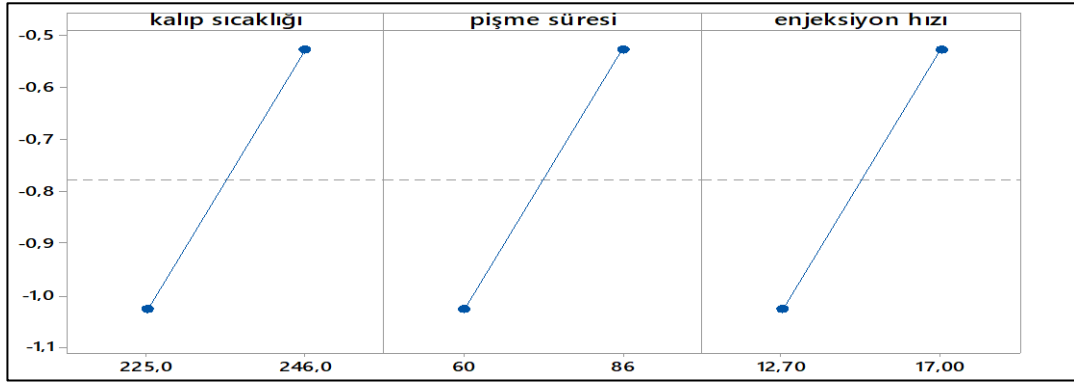
**Çizelge 5.** Çapak olmaması tepki değişkeni varyans analizi (ANOVA) tablosu

*Table 5. Variance analysis (ANOVA) table (no-burr response variable)*

Değişkenliğin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Anlamlılık Seviyesi
Model	7	10,5000	1,50000	171,00	0,000
Girdi Değişkenleri	3	4,5000	1,50000	171,00	0,000
kalıp sıcaklığı	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
pişme süresi	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
2 li Etkileşimler	3	4,5000	1,50000	171,00	0,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
kalıp sıcaklığı*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
3 lü Etkileşimler	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
Hata	19	0,1667	0,00877		
Eğrilik	1	0,1667	0,16667	*	*
Saf Hata	18	0,0000	0,00000		
Toplam	26	10,6667			

Çizelge 5. incelendiğinde; tüm faktörlerin ve faktör etkilerinin p değerinin 0,05'ten küçük olduğu ve anlamlı oldukları görülmektedir. Bu eksende; tüm faktörler ve faktör etkileşimlerinin tepki değişkenine etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir.

Çapak olmaması bağımlı değişkeni için, deney sonuçları, Minitab programı yardımıyla analiz edilmiş olup, %95 güven aralığında varyans analizi uygulanmış olup, faktör etkileri grafiği (Şekil 7)' de gösterilmiştir.



Şekil 7. Çapak olmaması tepki değişkeni için faktör etkileri grafiği

Figure 7. Factor effects graph for no burr response variable

Çapak olmaması bağımlı değişkeni incelendiğinde en etkili faktörün enjeksiyon hızı olduğu diğer girdi değişkenlerinin de anlamlı etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Çapak olmaması bağımlı değişkenine ait regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$Y_{\text{çapak olmaması}} = -147,1 + 0,6491x_1 + 2,434x_2 + 11,50x_3 - 0,010819x_1 x_2 - 0,05111x_1 x_3 - 0,1917x_2 x_3 + 0,000852x_1x_2 x_3 \quad (5)$$

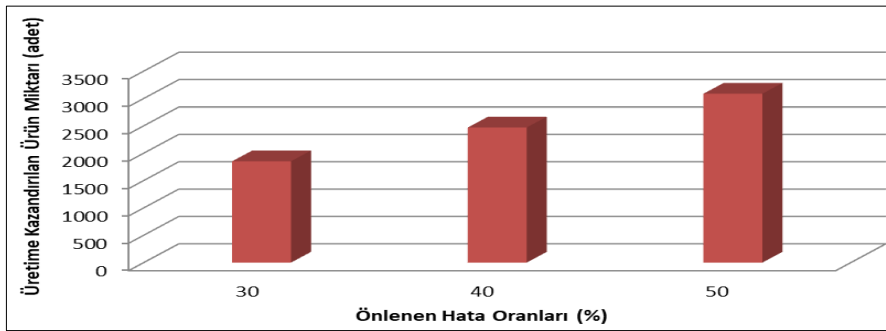
$x_1$ =kalıp sıcaklığı,

$x_2$ =pişme süresi,

$x_3$ =enjeksiyon hızı

Geliştirilen modelin  $R^2_{adj}$  değerinin %97,32 olarak hesaplanmış olup, deneysel tasarım modelinde etkili olan kalıp sıcaklığı karar değişkeni, çapak olmaması girdi değişkenlerinin, tepki değişkeni üzerindeki değişkenliğin %97,86' ini açıkladığı belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada incelenen kalite değişkenleri kaynaklı hataların minimuma indirilmesi için, tepki yüzeyi tasarımları yaklaşımı ile çoklu tepki optimizasyonu uygulanarak incelenen girdi değişkenlerinin optimum değeri belirlenmiştir. Çalışmanın yapıldığı enjeksiyon makinesine kalıp sıcaklığı 236.55 °C, pişme süresi 71.7 sn ve enjeksiyon hızı ise 12.9 mm/sn olarak ayar yapıldığında; ortaya çıkan firelerin (müşteriden iade edilen ürün) minimize edilmesi sağlanmış olacaktır. İşletmenin mevcut verileri incelendiğinde; 2018' de 11328 adet firenin 6173 tanesi (toplam hataların %54' ü) bağımlı değişken olarak belirlenen hatalardan kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Öngörülen modelin uygulamada devreye alınması sonucunda; tepki değişkeni kaynaklı hatanın %54' ünün önlenebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Gerçekleştirilen analizler çerçevesinde; işletmede herhangi teknolojik yada makine yatırımı yapılmadan sadece makine-süreç parametrelerindeki optimizasyon sonuçlarının uygulanması ile; incelenen hatalarda %30, %40 ya da %50 oranlarında iyileştirme sağlayacağı düşünülecek olursa; üretime kazandırılan ürün miktarı ve önlenecek hata oranları grafiği Şekil 8.' de verilmiştir.



**Şekil 8.** Üretime kazandırılan ürün miktarı ile önlenen hata oranları grafiği  
*Figure 8.* Graph of the amount of product prevented by the amount of product brought into production

Şekil 8.'den de görüleceği üzere; sızdırmazlık contası üretiminde, makine-proses parametrelerinin optimize edilmesi durumunda; 2017-2020 yılları arasında, en çok karşılaşılan kalite problemlerinin müşteriye ulaşmadan önce önemli ölçüde bertaraf edilmesi mümkün olacaktır. Gerçekleştirilen çalışmanın; kauçuk üretim sektöründe faaliyet gösteren işletmelerde; kalite kaynaklı hatalarının önüne geçilmesi, müşteri şikâyet sayısında azalma, imalat programlarının aksamaması ve sevkiyatların tam zamanlı gerçekleşmesi bakımından artı değer katacağı düşünülmektedir.

#### SONUÇ ve TARTIŞMA (RESULT and DISCUSSION)

Yapılan çalışmada; plastik enjeksiyon makinesinde kalite hatalarının minimizasyonu amacıyla, istatistiksel deneysel tasarım metodu kullanılarak makine-proses parametrelerinin optimizasyon problemi irdelenmiştir. Bu amaçla, Çerkezköy bölgesinde plastik sanayiinde faaliyet gösteren bir işletmede kauçuk malzemesinden FX 887 sızdırmazlık contası üreten bir işletmede uygulama yapılmıştır. İşletmede gerçekleştirilen araştırmalar çerçevesinde en sık rastlanan kalite problemleri belirlenmiş ve bu hatalardan kaynaklı maliyetlerin fazla olduğu görülmüştür. Belirlenen kalite hatalarını minimize etmek için, tepki yüzeyi tasarımlarından  $2^3$  tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanarak, regresyon tahmin modelleri oluşturulmuş ve çoklu tepki optimizasyonu ile, makine-proses parametrelerinin (kalıp sıcaklığı, pişme süresi ve enjeksiyon hızı) optimum değerleri tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada işletme kısıtlarından dolayı çok fazla sayıda deney tekrarı yapma imkânı olmamıştır. İleriki çalışmalarda; kaynakların daha etkin ve verimli kullanılması amacıyla; daha geniş aralıkta deneysel tasarım noktalarında daha fazla sayıda deneyler gerçekleştirilerek, araştırmanın işletmeye sağlayacağı maddi kazanımların boyutu değerlendirilebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Acıgöz, M., 2014, Türkiye' de Kauçuk Sektörü ve Sorunları, Namık Kemal Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.
- Adamu M., Mohammed BS., Shafiq N., Liew MS., Alaloul WS. 2018, "Effect of Crumb Rubber And Nano Silica On The Durability Performance Of High Volume Fly Ash Roller Compacted Concrete Pavement", International Journal of Advanced and Applied Sciences, Sayı 5, ss 53-61.
- Aygün, A., 2012, "Tekstil Endüstrisi Reaktif ve Dispers Boya Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon Prosesi ile Arıtımı: Yanıt Yüzey Yöntemi ile Optimizasyonu", Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Konya.
- Da Costa, HM., Ramos, VD., Da Silva, WS. ve Sirqueira, AS., 2010, "Analysis and Optimization of Polypropylene (PP) / Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM) / Scrap Rubber Tire (SRT) Mixtures Using RSM Methodology", Polimer Testing, Cilt 29, Sayı 5, ss. 572-578.
- Demir, L., 2004, "İstatistiksel Deneysel Tasarım Yöntemi ve Bir Tekstil İşletmesinde Uygulanması", Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.

- Durmaz, S., 2008, "Taguchi Metodunun Kauçuğun Vulkanizasyonu Prosesine Uygulanması", Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Erbatur, O. ve Erkek, E., 2007, "Karbon Siyahı/Yağ ve Karbon Siyahı/Dolgu Maddesi Oranının Farklı Vulkanizasyon Sistemlerinde Epdm Kauçuğunun Fizikomekaniksel Özellikleri Üzerine Etkisi", Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Ghoreishy, MHR., Karrabi, M., Nouri, MR., 2001, "Development of Optimized Rubber Compounds for the Components of the Bead Section of A Low Aspect Ratio Steelbelted Radial Tire", Iranian Polymer Journal, Cilt 10, ss. 115-123.
- Kaya, Y., 2009, "Karışım Tasarımı Yöntemiyle Lastik Esaslı Yeni Bir Ürün Geliştirilmesi", Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Khed, VC., Mohammed, BS., Nuriddin, MF., 2018, "Effects of different crumb rubber sizes on the flowability and compressive strength of hybrid fibre reinforced ECC", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Cilt 140, Sayı 1, ss. 12137.
- Kukreja, TR., Kumar, D., Prasad, K., Chauhan, RC., Choe, S. ve Kundu, PP. 2002, "Optimisation of Physical and Mechanical Properties of Rubber Compounds by Response Surface Methodology-Two Component Modelling Using Vegetable Oil and Carbon Black", European Polymer Journal, Sayı 38, ss.1417-1422.
- Lasprilla-Boteroa J., Álvarez-Láinez M. ve Acostab DA., 2016, "Water-Based Adhesive Formulations For Rubber To Metal Bonding Developed By Statistical Design Of Experiments", International Journal of Adhesion and Adhesives, Cilt73, ss. 58-65.
- Liu, Z., Li, X., Xu, X., Wang, X., Dong, C., Liu, F. ve Wei, W., 2015, "Devulcanization of Waste Tead Rubber in Supercritical Carbon Dioxide: Operating Parameters And Product Characterization", Polymer Degradation and Stability, Cilt 119, ss. 198-207.
- Montgomery C. Douglas., 2013, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Inc, USA.
- Savaşkan, M., Taptık, Y. ve Ürgen, M., 2004, "Deney Tasarımı Yöntemi ile Matkap Uçlarında Performans Optimizasyon", itüdergisi/d mühendislik, Cilt 3, ss. 117-128.
- Şanyılmaz, M., 2006, "Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirme Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemi ile Bir Uygulama", Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- Türkyılmaz, H., 2011, "Kurşun İyonlarının Kesikli Adsorpsiyon Proses ile Gideriminin Cevap Yüzey Yöntemiyle Optimizasyonu", Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta